



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## SIMULACE ZKRATOVÝCH ZKOUŠEK VE ZKRATOVÉ ZKUŠEBNĚ

SIMULATION OF SHORT CIRCUIT TESTS IN A SHORT-CIRCUIT LABORATORY

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Vykoukal

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

BRNO 2017

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Tomáš Vykoukal

**ID:** 162855

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

## NÁZEV TÉMATU:

### Simulace zkratových zkoušek ve zkratové zkušebně

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište zapojení a parametry zkratové zkušebny.
2. Sestavte simulační model pro simulaci zkratové zkušebny.
3. Proveďte výpočet potřebných parametrů.
4. Proveďte sérii simulací pro ověření simulačních modelů.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Patočka M.: Magnetické jevy a obvody. VUTIUM, Brno, 2011.

[2] <https://www.mathworks.com/products/simpower.html>

[3] <http://www.femm.info/wiki/HomePage>

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 31.5.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Úkolem této bakalářské práce bylo vytvoření simulace zkratové zkušebny, která je součástí UVEE. Zkratová zkušebna je komplexní zařízení, které obsahuje několik typů elektrických strojů a zařízení, které jsou zapojeny do jednoho okruhu. V rámci bakalářské práce jsme se seznámili se zapojením zkratové zkušebny a v Matlabu v jeho toolboxu Simscape Power Systems jsme provedli jednoduchou simulaci.

## **Klíčová slova**

Zkrat na synchronním generátoru; Simscape Power Systems

## **Abstract**

The task of this bachelor thesis was to create a short-circuit simulation test room. This short-circuit simulation test room is part of UVEE. Short-circuit test room is a complex device, which contains several types of electric machines and equipments involved in one circuit. We got to know with the involvement of short-circuit test room. And we conducted a simple simulation in Matlab toolbox Simscape Power Systems.

## **Keywords**

Short-circuit on a synchronous generator, Simscape Power Systems

### **Bibliografická citace:**

VYKOUKAL, T. *Simulace zkratových zkoušek ve zkratové zkušebně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 34 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D..

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Simulace zkratových zkoušek ve zkratové zkušebně jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **31. května 2017**

.....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Rostislavu Huzlíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **31. května 2017**

.....

# Obsah

1	Úvod .....	8
2	Zapojení zkratové zkušebny .....	9
3	Simscape Power Systems .....	12
3.1	Matlab.....	12
3.2	Simulink.....	12
3.3	Simscape.....	12
3.4	Simscape Power Systems.....	13
4	Zkrat na synchronním generátoru .....	15
5	Systém přípojníc a kabelového vedení .....	18
5.1	Výpočet parametrů přípojníc v programu FEMM.....	21
5.2	Výpočet parametrů kabelového vedení .....	23
6	Simulace zkratové zkušebny .....	24
6.1	Parametry synchronního generátoru .....	24
6.2	Simulace v Simscape Power Systems.....	25
7	Závěr .....	32
	Literatura .....	33
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	34

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Schéma zapojení zkratové zkušebny.....	11
Obrázek 2 – Sada elektrických strojů nabízených knihovnou Simscape Power Systems .....	13
Obrázek 3 – Možnosti výběru různých modelů synchronních strojů .....	14
Obrázek 4 – Průběhy proudů při zkratu: statorový proud, budící proud, proud tlumícím vinutím.....	17
Obrázek 5 – Schéma přípojniového systému zkratové zkušebny s uvedenými délkami a rozměry jednotlivých přípojníc .....	19
Obrázek 6 – Úseky, délky a rozměry přípojníc, na kterých byla měřena vzájemná plus vlastní indukčnost.....	20
Obrázek 7 – Rozměry přípojníc .....	22
Obrázek 8 – Schéma strany vyššího napětí použité v Simulinku .....	25
Obrázek 9 – Průběh zkratového proudu na straně vyššího napětí.....	26
Obrázek 10 – Průběh zkratového napětí na straně vyššího napětí .....	27
Obrázek 11 – Schéma zkratové zkušebny použité v Simulinku .....	28
Obrázek 12 – Průběh zkratového proudu na straně zkoušence .....	29
Obrázek 13 – Průběh zkratového napětí na straně zkoušence .....	29
Obrázek 14 – Průběhy zkratového proudu a napětí provedené zkoušky .....	31



## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Jmenovité hodnoty synchronního generátoru .....	9
Tabulka 2 – Hodnoty nastavitelných odboček tlumivky .....	9
Tabulka 3 – Hodnoty nastavitelných odboček rezistoru .....	10
Tabulka 4 – Jmenovité hodnoty zkratového transformátoru TT2 .....	10
Tabulka 5 – Jmenovité hodnoty zkratového transformátoru TT3 .....	10
Tabulka 6 – Úseky přípojnicového systému .....	21
Tabulka 7 – Velikosti odporů a indukčností jednotlivých úseků získaných z programu FEMM .....	22
Tabulka 8 – Parametry kabelového vedení .....	23
Tabulka 9 – Parametry synchronního generátoru potřebné pro simulaci .....	24
Tabulka 10 – Velikosti reaktancí zadaných v pu .....	24
Tabulka 11 – Velikosti časových konstant .....	25
Tabulka 12 – Označení a výchozí parametry provedené zkoušky .....	30
Tabulka 13 – Vyhodnocené veličiny provedené zkoušky .....	30

# 1 ÚVOD

Smyslem této práce je simulace zkratové zkušebny na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně. Na zkušebně je možné provádět dva typy zkratů. Zkrat na synchronním generátoru, kterým se budeme v této práci zabývat a zkrat ze sítě přes transformátor. Ten se však v této práci řešit nebude, proto ho již dále nebudeme zmiňovat.

Synchronní generátor je elektrický stroj, jehož název je odvozen z toho, že jeho rotor se otáčí se stejnou rychlostí jako točivé magnetické pole statoru. Synchronní generátory se používají pro výrobu elektrické energie a to nejen činné, ale i jalové. Jejich nevýhodou je, že se nedokáží samy rozběhnout z klidového stavu.

Synchronní stroj se skládá z rotoru a statoru. Na rotoru je obvykle umístěno budící vinutí napájené stejnosměrným proudem. Rotor synchronního stroje je vyroben z kvalitní oceli, tím pádem v něm nevznikají ztráty v železe. Stator se skládá z izolovaných plechů a v drážkách má uloženo třífázové vinutí. Vzduchová mezera se může volit několikrát větší než u asynchronních strojů, a to z důvodu, že synchronní stroje neodebírají ze sítě jalový výkon. Z konstrukčního hlediska se synchronní stroje dělí na dva základní typy. Stroj s vyniklými póly a stroj s hladkým rotorem. Stroj s vyniklými póly je většinou poháněn pomaloběžnými turbínami s typickými otáčkami  $500 \text{ min}^{-1}$  a velkým počtem elektrických pólů. Jeho typickým znakem je velký průměr a malá osová délka. Stroj s hladkým rotorem je poháněn rychloběžnými turbínami. Typicky se jedná o stroj se dvěma nebo čtyřmi póly a otáčkami  $3000 \text{ min}^{-1}$  nebo  $1500 \text{ min}^{-1}$ . Naopak od stroje s vyniklými póly se odlišuje menším průměrem a větší osovou délkou.

Za konstantní rychlosti nabuzeného rotoru se v cívkách statoru indukují střídavá napětí. Tato napětí jsou časově posunutá o  $120^\circ$  při uvažování sinusového průběhu magnetického pole. [6] [7] [8]

## 2 ZAPOJENÍ ZKRATOVÉ ZKUŠEBNY

Zkratová zkušebna na FEKT VUT se skládá ze strany vyššího napětí a strany nižšího napětí. Strana vyššího napětí začíná na šestipólovém synchronním generátoru GS1 zapojeným do hvězdy se jmenovitým výkonem 16 MVA, jmenovitým napětím 6,3 kV při frekvenci 50 Hz. Tyto parametry jsou uvedeny v Tabulce 1.

**Tabulka 1 – Jmenovité hodnoty synchronního generátoru**

Jmenovitý zdánlivý výkon $S_n$	MVA	16
Jmenovité napětí $U_n$	V	6300/7560
Jmenovitý proud $I_n$	A	1466/1222
Jmenovitá frekvence $f_n$	Hz	50/60
Účinník $\cos \varphi$	-	0,8
Jmenovité otáčky $n_n$	$\text{min}^{-1}$	1000/1200

Následuje odpojovač se zemnicím nožem Q5 dimenzovaný na 12 kV a 2500 A. Z něj se dostáváme na vypínač QM3. Za vypínačem je tyristorový spínač TH1, na kterém je možné provést bypass. Z něj obvod pokračuje přes tlumivku RL1 s nastavitelnými odbočkami a rezistor RR1 na zkratový transformátor TT2 jehož parametry jsou uvedeny v Tabulce 4. Hodnoty odboček tlumivek a rezistorů jsou uvedeny v Tabulkách 2 a 3.

**Tabulka 2 – Hodnoty nastavitelných odboček tlumivky**

Cívka	$L_{cm}$ [mH]	$R_{cm}$ [mΩ]
1	0,032	1,392
2	0,117	2,969
3	0,205	4,136
4	0,311	5,351
5	0,387	6,123
6	0,899	10,49
7	1,562	15,19
8	2,422	20,69
9	3,466	26,92
10	4,688	33,95
11	6,148	42,15
12	7,778	51,26
13	9,716	62,37

**Tabulka 3 – Hodnoty nastavitelných odboček rezistoru**

Zapojené odbočky	$R_{cv} [\Omega]$	$R_{cm} [\Omega]$
8 - 9	0,3	0,3087
7 - 8	0,3	0,3077
6 - 7	0,15	0,156
5 - 6	0,15	0,1567
4 - 5	0,15	0,1563
3 - 4	0,15	0,156
2 - 3	0,15	0,1567
1 - 2	0,15	0,1563
4 - 5 # 3 - 4 # 2 - 3	0,05	0,05477

**Tabulka 4 – Jmenovité hodnoty zkratového transformátoru TT2**

Jmenovitý výkon $S_n$	MVA	16
Jmenovité napětí primární strany $U_{n1}$	V	4800, 5400, 6000, 6600, 7200
Jmenovité napětí sekundární strany $U_{n2}$	V	250, 500, 750, 1000
Procentní napětí nakrátko $u_k$	%	2,5

Za ním následuje strana nižšího napětí. Ta má dvě různé cesty ke zkušební stolici. Cesta k první zkušební stolici ZS1 vede rovnou ze zkratového transformátoru přes Rogowského cívky BC1 do 150 kA. Ke druhé zkušební stolici ZS2 vede cesta přes zkratový transformátor TT3 (který je možno obejít) přes zátěž pro zkušební stolicí tvořenou rezistorem RR2 a tlumivkou RL2. Parametry zkratového transformátoru TT3 jsou uvedeny v Tabulce 5.

**Tabulka 5 – Jmenovité hodnoty zkratového transformátoru TT3**

Jmenovitý výkon $S_n$	MVA	2,5
Jmenovité napětí primární strany $U_{n1}$	V	1000
Jmenovité napětí sekundární strany $U_{n2}$	V	25, 50, 100
Procentní napětí nakrátko $u_k$	%	4

Na tuto cestu je paralelně připojen rozváděč měření napětí, který se skládá z měřicího transformátoru proudu TV7 a odpojovače QF7. Dále je paralelně připojený tyristorový spínač TH2 ve společném konstrukčním celku s diodovým usměrňovačem TD2. Za zkušební stolicí je ještě zátěž tvořená rezistorem RR3 a tlumivkou RL3. [9]

11

## **3 SIMSCAPE POWER SYSTEMS**

### **3.1 Matlab**

Matlab je inženýrský programovací jazyk pro technické výpočty a analýzu dat. Matlab nám nabízí možnosti řešení v oblastech jako je návrh řídicích systémů, aplikovaná matematika, robotika, zpracování signálu a mnoha dalších. Jazyk pracuje na základě vektorových a maticových operací. Nabízí možnost postupného řešení, díky kterému můžeme dospět k optimálnímu řešení. [5]

### **3.2 Simulink**

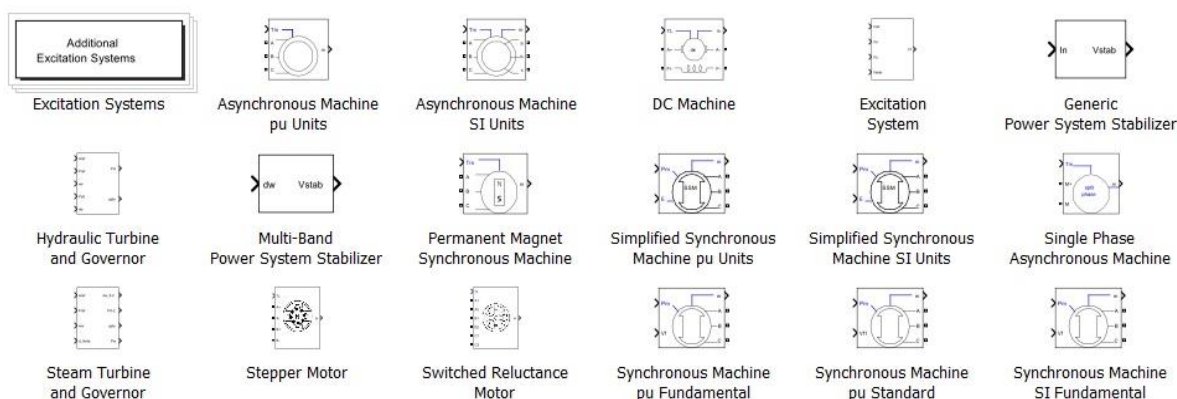
Simulink je nadstavbou Matlabu. Slouží k rychlé a snadné simulaci a modelování dynamických soustav ve formě blokových schémat. Modely lze popsat rovnicemi nebo je možnost sestavit je z bloků reálných systémů. Pracovní prostředí Simulinku je grafický editor a k modelaci slouží knihovny předdefinovaných bloků. V této práci budeme používat knihovnu Simscape, přesněji její nadstavbu SimscapePower Systems. [5]

### **3.3 Simscape**

Knihovna Simscape slouží k modelaci fyzikálních systémů zahrnujících mechanické, elektrické, hydraulické a další komponenty. Tato knihovna poskytuje základní prvky těchto oblastí. Ze základních prvků lze skládat vlastní složitější bloky a schémata. V Simscapu lze rozšiřovat i vytvářet vlastní prvky, a to díky vlastnímu matlabovskému jazyku, který Simscape obsahuje. [2]

### 3.4 Simscape Power Systems

Knihovna Simscape Power Systems slouží k modelaci a simulaci výkonové elektroniky a energetických soustav. Obsahuje rozšíření základních prvků knihovny Simscape, jako jsou prvky pro simulaci výroby, přenosu a distribuce elektrické energie. Prvky, které tato knihovna obsahuje, reprezentují reálné komponenty simulovaného schématu, jako jsou třeba elektrické stroje, elektrické pohony nebo třeba prvky obnovitelných zdrojů energie. Umožňuje také automatické výpočty harmonické analýzy, činitele harmonického zkreslení (THD), zatížení soustavy a další klíčové analýzy a pomáhá zjišťovat výkony našeho návrhu.

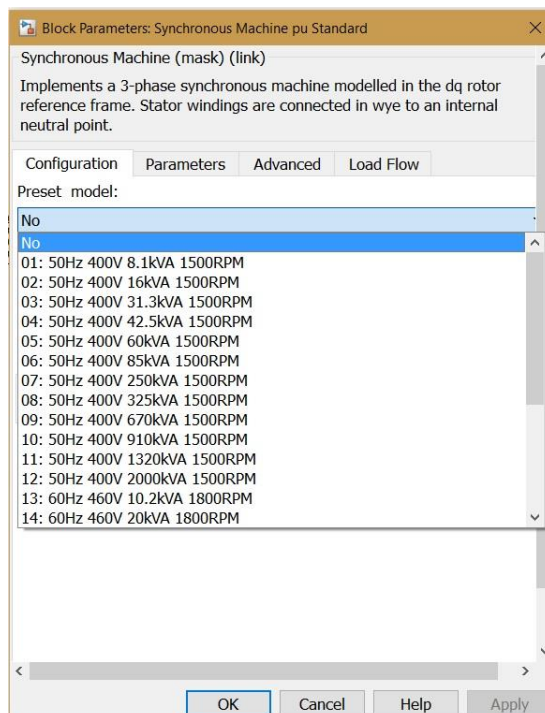


Obrázek 2 – Sada elektrických strojů nabízených knihovnou Simscape Power Systems

Simscape Power Systems nabízí sadu standartních i zjednodušených modelů synchronních a asynchronních strojů (Obrázek 2). Tyto modely si můžeme nastavit podle vlastních parametrů nebo si zvolit z několika nabízených typů (Obrázek 3). Knihovna umožňuje i simulaci působení nelineárních jevů, jako například saturaci. Bloky v Simscape Power Systems počítají v jednotkách per unit, takže pro získání reálných hodnot je musíme přepočítat. Například pro přepočet reaktance z per unit na ohmy provedeme pomocí vztahu:

$$X_d = Z_B \cdot X_{d,pu} \quad (3.1)$$

kde  $X_d$  je reaktance v ohmech,  $Z_b$  je impedance v ohmech a  $X_{d,pu}$  je reaktance v per unitech. [1] [3] [4] [8]



**Obrázek 3 – Možnosti výběru různých modelů synchronních strojů**



## 4 ZKRAT NA SYNCHRONNÍM GENERÁTORU

Přesný rozbor analytickými metodami je obtížný. Vyžaduje simulační metody pomocí počítačových programů. Těmito simulacemi se budeme zabývat níže v praktické části práce.

Budeme uvažovat třífázový zkrat na svorkách dvoupólového synchronního generátoru s vyniklými póly při stavu naprázdno. Během tohoto stavu nedochází ke změně synchronní rychlosti. Ohmický odpor statorových vinutí je vzhledem k reaktanci zanedbatelný. Budeme uvažovat čistě jalové proudy, které budou za napětím opožděné o  $\pi/2$ .

Zkratové proudy budou mít střídavou a stejnosměrnou složku. Velikost stejnosměrné složky proudu závisí na okamžité velikosti napětí v okamžiku zkratu. Tato složka budí v prostoru stojící pole. Díky němu se v rotujících vinutích na rotoru indukují střídavé proudy o statorovém kmitočtu. Jejich amplituda klesá úměrně se zmenšováním stejnosměrné složky ve statoru. Tyto proudy vyvolávají magnetické pole v rotoru točící se synchronně s točivým polem statoru.

Vzhledem k tomu, že zkrat má rázový charakter, se všechny změny magnetických polí odehrávají z větší části na rozptylových cestách jednotlivých rotorových vinutí. Pro zjednodušení budeme na rotoru uvažovat pouze vinutí budící a tlumící. Jejich charakteristiky jsou značně rozdílné. Reakce tlumícího vinutí odezní v několika prvních periodách zkratu. Zato budící vinutí ovlivňuje průběh zkratu po dobu několika desítek period, než dojde k ustálenému chodu nakrátko. Při tomto stavu může stroj pracovat s proudem  $I_k < I_n$ . Proud  $I_k$  je závislý na velikosti budícího proudu v okamžiku zkratu. V našem případě velikost budícího proudu odpovídá svorkovému napětí naprázdno.

Pro třífázový zkrat při chodu naprázdno můžeme odvodit střídavou složku zkratového proudu statoru vztahem:

$$I_d = -\sqrt{2} \cdot U_0 \left[ \left( \frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left( \frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_q''} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right] \cdot \cos(\omega t + \alpha_0) \quad (4.1)$$

kde  $X_d''$  je rázová podélná reaktance,  $X_d'$  je přechodná podélná reaktance,  $X_d$  je synchronní podélná reaktance,  $T_d''$  je rázová podélná časová konstanta nakrátko a  $T_d'$  je přechodná podélná časová konstanta nakrátko.

Z této rovnice vyplývá, že maximální amplituda obálky střídavé složky proudu statoru v čase  $t = 0$  je:

$$I_{d,max} = \frac{\sqrt{2}U_0}{X_d''} \quad (4.2)$$

Stejnosemřná složka proudu se u strojů s vyniklými póly periodicky mění, jelikož netočivé magnetické pole vyvolané tímto proudem kmitá vlivem opakující se změny reluktance v podélné a příčné ose s kmitočtem  $2f_1$ . Pro stejnosemřnou složku lze odvodit vztah:

$$I_a = -\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot U_0 \left[ \left( \frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cdot \cos \alpha_0 + \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right) \cdot \cos(2\omega t + \alpha_0) \right] \cdot e^{-\frac{t}{T_a''}} \quad (4.3)$$

Výsledný zkratový proud ve statoru je:

$$i_z = i_d + i_a$$

Proud budícího vinutí při zkratu je určen třemi složkami. První je stejnosemřný budící proud dodávaný z budiče před i během zkratu, druhá je stejnosemřná složka indukovaná od zanikajících střídavých složek statorového proudu točících se synchronně s rotorem. A třetí je střídavá složka indukovaná polem stejnosemřné klesající složky statorového proudu. [6] [7] [8]

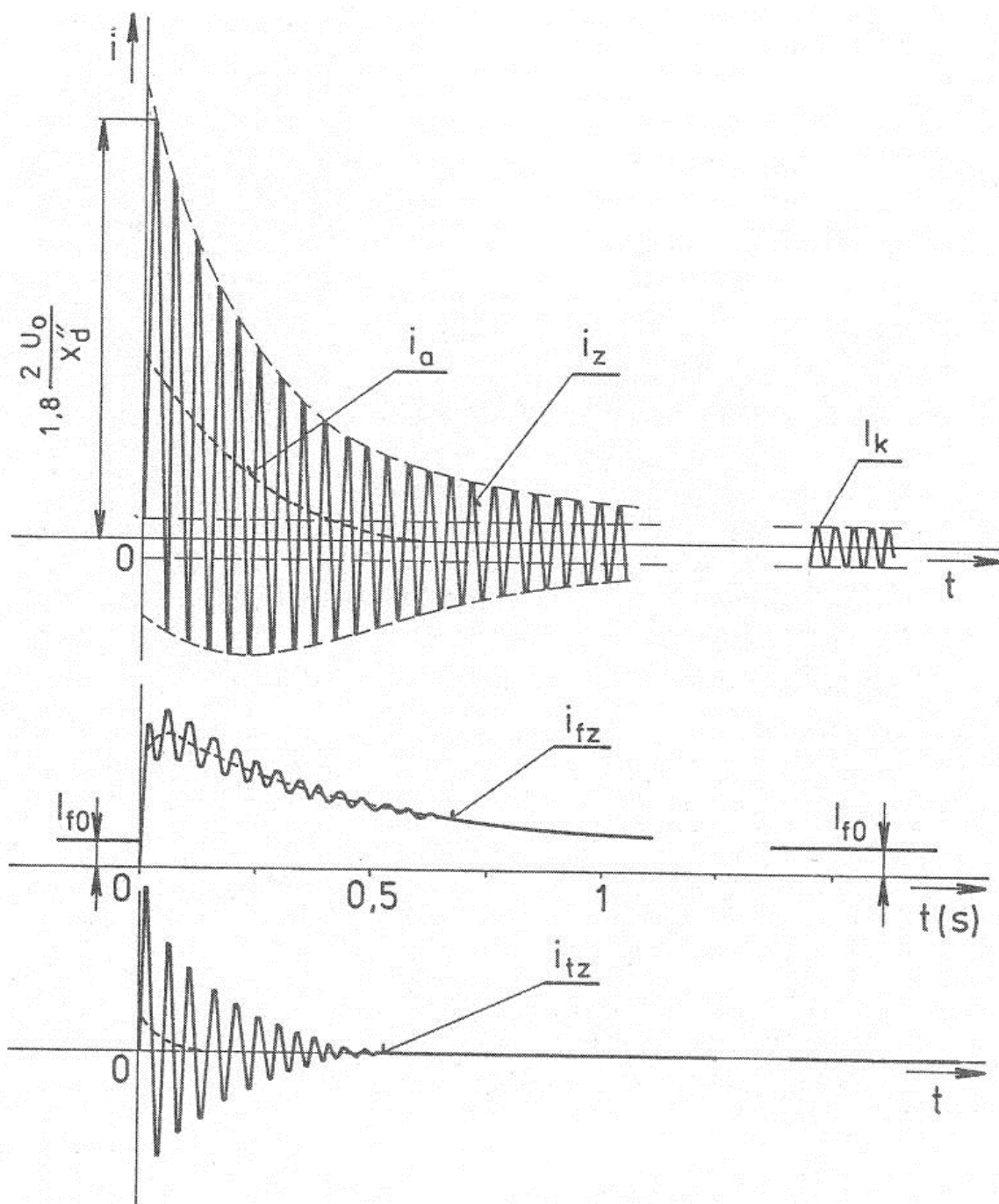
$$i_A = -\frac{\sqrt{2} \cdot U_0}{X_d''} [g(t) \cos(\omega t + \alpha_0)] + \frac{\sqrt{2} \cdot U_0}{2} e^{-\frac{t}{T_a}} \left[ \left( \frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cos \alpha_0 + \left( \frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cos(2\omega t + \alpha_0) \right] \quad (4.4)$$

$$i_B = -\frac{\sqrt{2} \cdot U_0}{X_d''} \left[ g(t) \cos \left( \omega t + \alpha_0 - \frac{2\pi}{3} \right) \right] + \frac{\sqrt{2} \cdot U_0}{2} e^{-\frac{t}{T_a}} \left[ \left( \frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cos \alpha_0 + \left( \frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cos \left( 2\omega t + \alpha_0 - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (4.5)$$

$$i_C = -\frac{\sqrt{2} \cdot U_0}{X_d''} \left[ g(t) \cos \left( \omega t + \alpha_0 - \frac{4\pi}{3} \right) \right] + \frac{\sqrt{2} \cdot U_0}{2} e^{-\frac{t}{T_a}} \left[ \left( \frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cos \alpha_0 + \left( \frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right) \cos \left( 2\omega t + \alpha_0 - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \quad (4.6)$$

kde  $g(t)$  je:

$$g(t) = X_d'' \left[ \left( \frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \cdot e^{-t/T_d''} + \left( \frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-t/T_d'} + \frac{1}{X_d} \right] \quad (4.7)$$

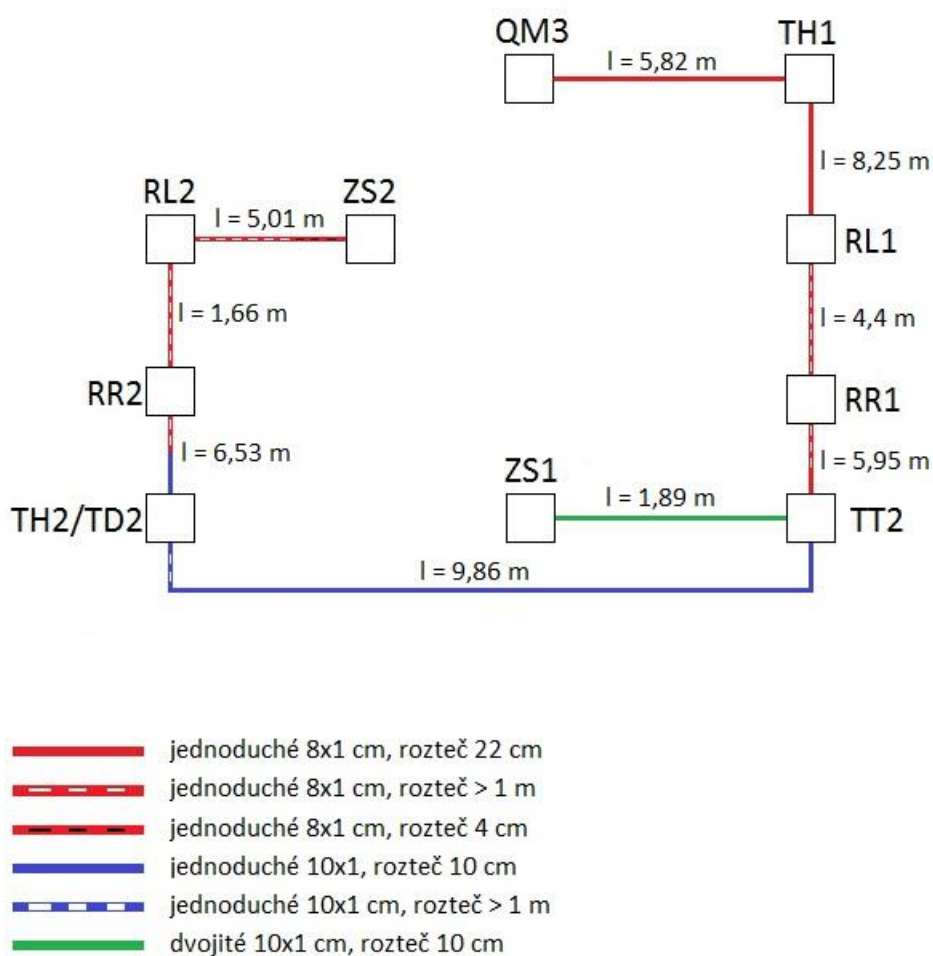


Obrázek 4 – Průběhy proudů při zkratu: statorový proud, budící proud, proud tlumícím vinutím [7]

## 5 SYSTÉM PŘÍPOJNIC A KABELOVÉHO VEDENÍ

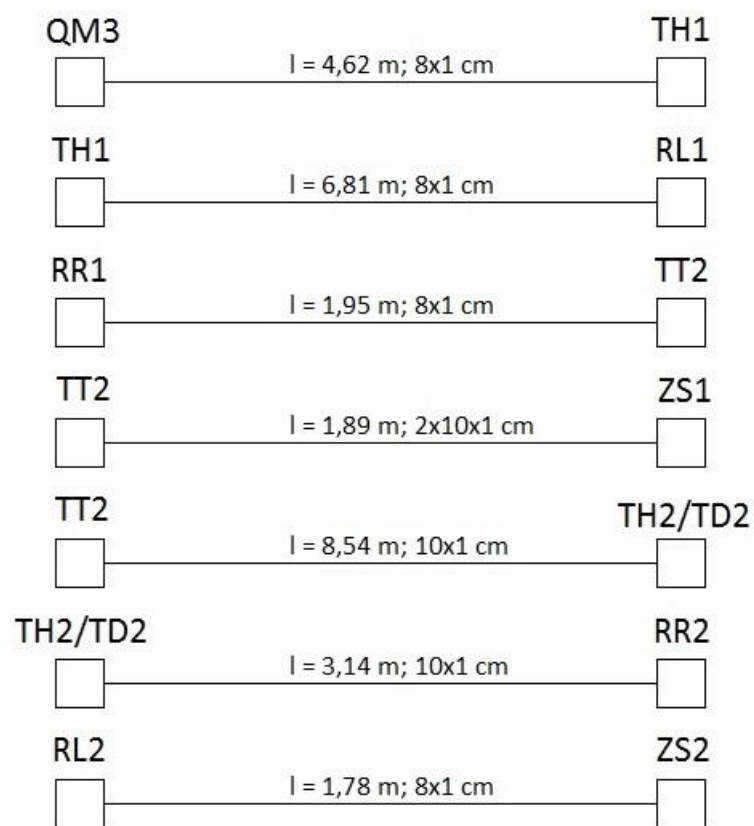
Na straně vyššího napětí začíná systém přípojníc na vypínači QM3, odkud vedou přípojnice o rozměrech 8x1 cm do tyristorového spínače TH1. Tyto přípojnice měří na délku 5,28 m. Z tyristorového spínače TH1 vedou přípojnice o rozměrech 8x1 a délce 8,25 m do nastavitelné tlumivky RL1. Za nastavitelnou tlumivku RL1 pokračují přípojnice o délce 4,4 m do nastavitelného rezistoru RR1. Přípojnice mají rozměry 8x1 cm. Z rezistoru RR1 vedou přípojnice 8x1 cm o délce 5,95 m na zkratový transformátor TT2.

Na straně nižšího napětí vedou z transformátoru TT2 dvě různé cesty ke zkušební stolici. První vede rovnou do zkušební stolice ZS1 a jsou zde instalovány dvojité přípojnice o rozměrech 10x1 cm, které mají délku 1,89 m. Druhá cesta vede do konstrukčního celku tvořeného tyristorovým spínačem TH2 a diodovým usměrňovačem TD2. Délka přípojníc na této trase měří 9,86 m a přípojnice mají rozměry 10x1 cm. Za konstrukčním celkem TH2/TD2 pokračují přípojnice do rezistoru RR2, na této trase jsou na délce 3,14 m instalovány přípojnice 10x1 cm. Ty pak přecházejí do menších přípojníc 8x1 cm. Tyto pak na délku měří 3,39 m. Z rezistoru RR2 pokračují do tlumivky RL2. Tyto přípojnice mají rozměry 8x1 cm a délku 1,66m. Z tlumivky RL2 pak pokračují přípojnice 8x1 cm na zkušební stolicí ZS2. Tato trasa měří 5,01 m. Toto vedení přípojníc je zobrazeno na Obrázku 5.



**Obrázek 5 – Schéma přípojniového systému zkratové zkušebny s uvedenými délkami a rozměry jednotlivých přípojníc**

U přípojníc byla měřena vlastní a vzájemná plus vlastní indukčnost. Vzájemná plus vlastní indukčnost byla měřena pouze na úsecích, na kterých rozteče mezi jednotlivými fázemi byli menší než jeden metr. Tyto úseky a délky, na kterých byla indukčnost měřena jsou zobrazeny na Obrázku 6.



**Obrázek 6 – Úseky, délky a rozměry přípojníc, na kterých byla měřena vzájemná plus vlastní indukčnost**

## 5.1 Výpočet parametrů přípojníc v programu FEMM

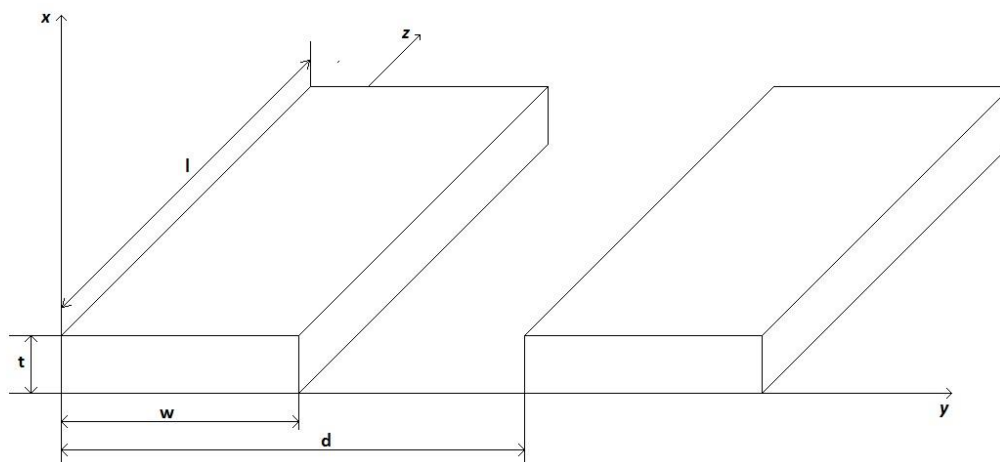
V programu FEMM jsme naprogramovali jednotlivé úseky přípojnícového systému, aby nám vypočítal indukčnosti a odpory přípojníc. V programování jsme postupovali takto. Nejprve jsme si nakreslili jednotlivé přípojnice podle rozměrů z Tabulky 6. Vysvětlení parametrů uvedených v Tabulce 6 je zobrazeno na Obrázku 7. Poté jsme v záložce PROBLEM nastavili délku měřeného úseku. Následně jsme si v záložce PROPERTIES nadefinovali materiály. Přípojnice jsou měděné, tak jsme v knihovně materiálů vybrali měď. Okolí přípojníc tvoří vzduch, tak jsme v knihovně vybrali vzduch. Poté jsme si také v záložce PROPERTIES nadefinovali proud, který prochází daným úsekem. Následně jsme nadefinovali přípojnícím, že jsou tvořeny mědí a každé přidělili příslušný proud. Proud jsme nastavili tak, že do prostřední přípojnice jsme nastavili amplitudu zadaného proudu. Do krajních přípojníc jsme nastavili mínus polovinu amplitudy zadaného proudu. Potom jsme okolí nadefinovali, že je tvořeno vzduchem. Nakonec jsme kolem přípojníc vytvořili pole, ve kterém pak program počítal indukčnost a odpor úseku. Kraji tohoto pole jsme nadefinovali okrajovou podmínku, kterou jsme vytvořili v záložce PROPERTIES.

**Tabulka 6 – Úseky přípojnícového systému (l – délka přípojníc; w – šířka přípojníc; d – rozteč mezi jednotlivými přípojnícemi plus šířka přípojníc; t – výška přípojníc)**

Úsek	l [m]	w [m]	d [m]	t [m]
QM3-TH1	4,62	0,08	0,3	0,01
TH1-RL1	6,81	0,08	0,3	0,01
RR1-TT2	1,95	0,08	0,3	0,01
TT2-ZS1	1,89	0,1	0,2	0,01
TT2-TH2/TD2	8,54	0,1	0,2	0,01
TH2/TD2-RR2	3,14	0,1	0,2	0,01
RL2-ZS2	1,78	0,08	0,12	0,01

V prvním případě jsme chtěli, aby nám program vypočítal vlastní indukčnost přípojníc. Pro tento výpočet jsme potřebovali, aby proud protékal jen jednou přípojnící a v ostatních dvou byl proud nulový. Takže jsme v záložce PROPERTIES nastavili, že jeden proud má hodnotu amplitudy proudu, který protéká daným úsekem. A zbylým dvěma proudům jsme nastavili hodnotu nula. Spustili jsme výpočet a zobrazené výsledky jsme zaznamenali do Tabulky 7.

Ve druhém případě jsme chtěli, aby program vypočítal vlastní plus vzájemnou indukčnost. Pro tento výpočet jsme nastavili v záložce PROPERTIES proud prostřední přípojnící jako amplitudu proudu, který protéká daným úsekem. Pro krajní přípojnice jsme nastavili mínus polovinu amplitudy proudu daného úseku a spustili výpočet. Zobrazené výsledky jsme následně zaznamenali do Tabulky 7.



**Obrázek 7 – Rozměry přípojníc**

Tento postup jsme opakovali pro každý úsek přípojnícového systému a z každého úseku jsme si nechali vypočítat vlastní, vzájemnou plus vlastní indukčnost a odpor. Všechny výsledky jsme zaznamenali do Tabulky 7. [10]

**Tabulka 7 – Velikosti odporů a indukčností jednotlivých úseků získaných z programu FEMM**

Úsek	$L_{vzv}$	$L_v$	R
QM3-TH1	2,014E-06	3,604E-06	9,96E-05
TH1-RL1	2,969E-06	5,313E-06	1,47E-04
RR1-TT2	8,490E-07	1,670E-06	4,20E-05
TT2-ZS1	2,219E-06	6,063E-06	6,52E-05
TT2-TH2/TD2	2,649E-06	6,996E-06	1,47E-04
TH2/TD2-RR2	9,840E-07	2,582E-06	5,41E-05
RL2-ZS2	4,350E-07	1,527E-06	3,84E-05



## 5.2 Výpočet parametrů kabelů

Pro vedení z generátoru GS1 do vypínače QM3 je instalováno kabelové vedení. Toto vedení tvoří kabel 1 x 240/25 (počet žil x průřez jádra [mm<sup>2</sup>]) a má na délku 7 metrů. Další parametry kabelového vedení jsou zobrazeny v Tabulce 8.

**Tabulka 8 – Parametry kabelového vedení**

$R_k$ [Ω/km]	$L_k$ [mH/km]	$l$ [km]	$R$ [Ω]	$L$ [mH]
0,0754	0,33	0,007	0,0005278	0,00231

Zadanými parametry kabelu byl odpor na kilometr a indukčnost na kilometr. Z těchto parametrů a délky jsme vypočítali celkový odpor a indukčnost kabelu podle vztahů:

$$R = R_k \cdot l \quad (5.1)$$

$$L = L_k \cdot l \quad (5.2)$$

kde  $R_k$  je odpor na kilometr [Ω/km],  $L_k$  je indukčnost na kilometr [mH/km] a  $l$  je délka kabelu [m].

## 6 SIMULACE ZKRATOVÉ ZKUŠEBNY

### 6.1 Parametry synchronního generátoru

Pro simulaci jsme použili parametry odpovídající parametrům zkratové zkušebny v VUT. Parametry reaktancí byli zadane v poměrných jednotkách per unit. Tyto parametry jsme museli pro použití v simulaci přepočítat z per unitů na ohmy, aby výsledky simulace odpovídali skutečnosti.

**Tabulka 9 – Parametry synchronního generátoru potřebné pro simulaci**

Jmenovitý zdánlivý výkon $S_n$	MVA	16
Jmenovité napětí $U_n$	kV	6,3
Jmenovitý proud $I_n$	kA	1,466
Frekvence $f$	Hz	50
Spojení statoru	Y	
Počet pólů	6	

Pro přepočet reaktancí jsme použili následující postup. Ze zadaného napětí a proudu jsme vypočítali básovou impedanci podle vztahu:

$$Z_B = \frac{U}{I} \quad (6.1)$$

kde  $U$  je vztažné napětí ve [V] a  $I$  vtažný proud v [A].

Následně jsme ze získané básově impedance a zadané reaktance v per unitech získali reaktanci v ohmech pomocí vztahu:

$$X = X_{pu} \cdot Z_B \quad (6.2)$$

kde  $X_{pu}$  je zadaná reaktance v [p.u.] a  $Z_B$  je básová impedance v [ $\Omega$ ].

**Tabulka 10 – Velikosti reaktancí zadaných v pu**

Synchronní podélná reaktance $X_d$	pu	1,5128
Přechodná podélná reaktance $X_d'$	pu	0,1261
Rázová podélná reaktance $X_d''$	pu	0,0766
Synchronní příčná reaktance $X_q$	pu	1,28
Rázová příčná reaktance $X_q''$	pu	0,088

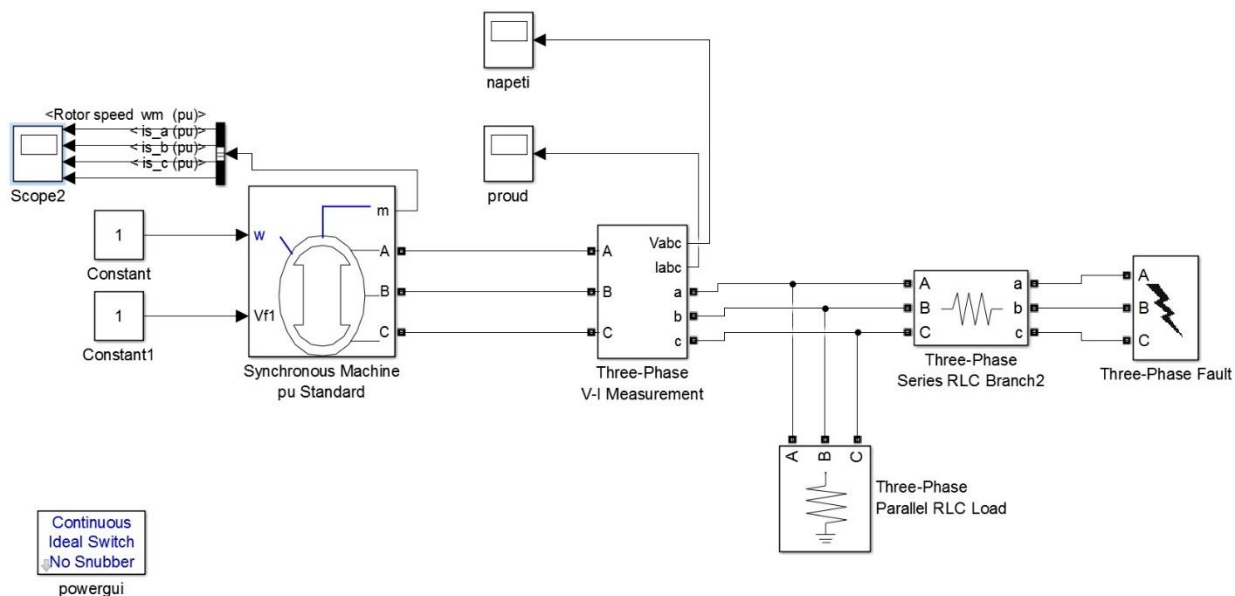
Pro simulaci jsme potřebovali ještě velikosti časových konstant. [8] [9]

**Tabulka 11 – Velikosti časových konstant**

Přechodná podélná nakrátko $T_d'$	s	0,3675
Rázová podélná nakrátko $T_d''$	s	0,0226
Rázová příčná nakrátko $T_q''$	s	0,035

## 6.2 Simulace v Simscape Power Systems

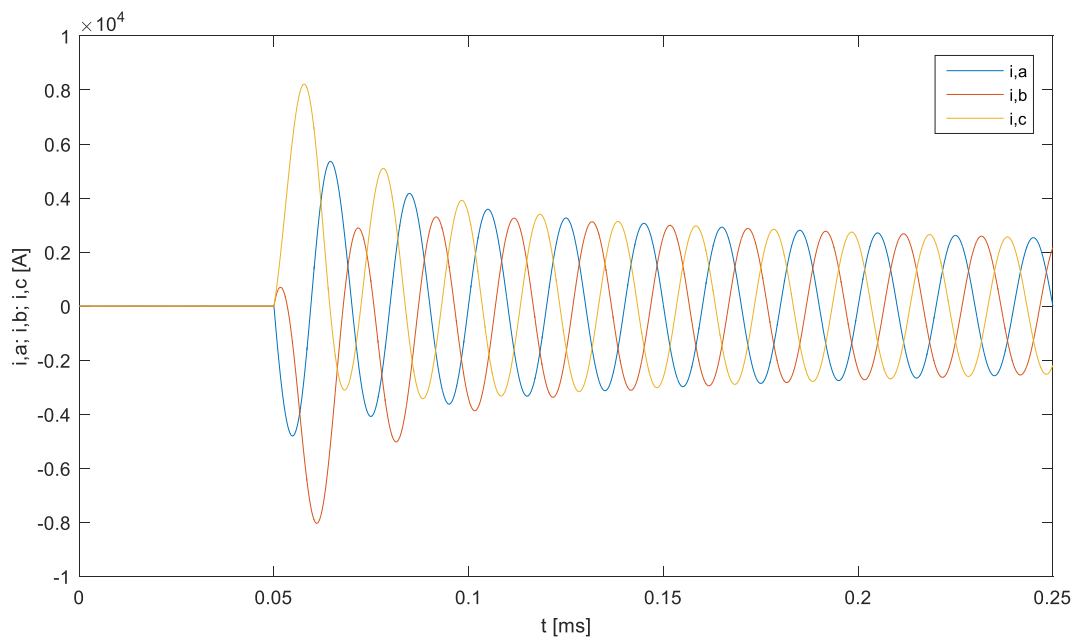
Pro simulaci v Simscape Power Systems jsme použili standardní model synchronního stroje a zadali jsme mu parametry, které jsou uvedené výše. Nejprve jsme nasimulovali stranu vyššího napětí. Model vytvořený v Simulinku je na Obrázku 8. Na výstupu z generátoru je zapojený multimetr, který nám bude snímat průběhy zkratového proudu a napětí na straně vyššího napětí. Za multimetrem jsme zapojili parametry vedení. Z nich jsme zapojili pouze odporovou složku, protože při zapojení indukční složky došlo k rozkmitání výstupního proudu a napětí. Potom jsme do obvodu museli zapojit malou zátěž proti zemi, neboť bez ní nechtěl simulátor pracovat. Nakonec jsme obvod zkratovali pomocí bloku „Three-Phase Fault“. Tomuto bloku jsme zadali, aby sepnul v čase 50 ms po začátku simulace a způsobil tak zkrat na synchronním generátoru. V modelu musí být zakomponován powergui. A to z důvodu, že oproti skutečnosti jsme zjednodušili simulaci tak, že při zkoušce jsou udržovány konstantní otáčky, tedy je udržována konstantní frekvence.



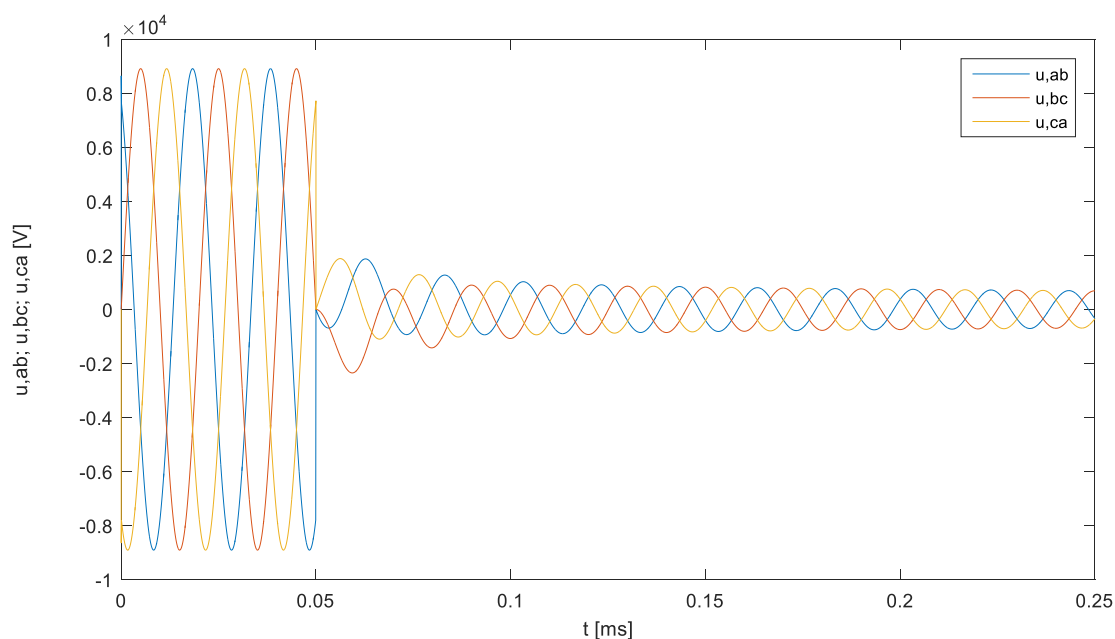
**Obrázek 8 – Schéma strany vyššího napětí použité v Simulinku**

Po spuštění simulace jsme si otevřeli snímač napětí a proudu za synchronním generátorem a sledovali průběhy napětí a proudu před a po zkratování obvodu. Tyto průběhy jsme zaznamenali a přenesli je ze Simulinku do Matlabu. V Matlabu jsme si pomocí funkce „scope“ nechali průběhy znovu vykreslit a uložili jsme je do formátu, který byl možný přenést do textového dokumentu.

Tyto průběhy můžeme vidět na Obrázku 9 a Obrázku 10. Na těchto průbězích je vidět, jak do času 50 ms po začátku se napětí drží na své jmenovité hodnotě a proud je nulový. Proudů a napětí jednotlivých fází jsou jen fázově posunuty. Zkrat nastává v čase 50 ms, tedy spínací úhel je  $270,8^\circ$ . Následně vidíme, že dochází k proudovému rázu, kde se hodnota proudu několikanásobně zvedne. U napětí naopak vidíme, že jeho hodnota se sníží. Po čase 50 ms dochází k přechodnému ději a následně k jeho ustálení. Toto ustálení může trvat několik period. V našem případě jsme simulaci nechali jet jen 200 ms po zkratu, což je maximální doba zkratu na zkratové zkušebně.



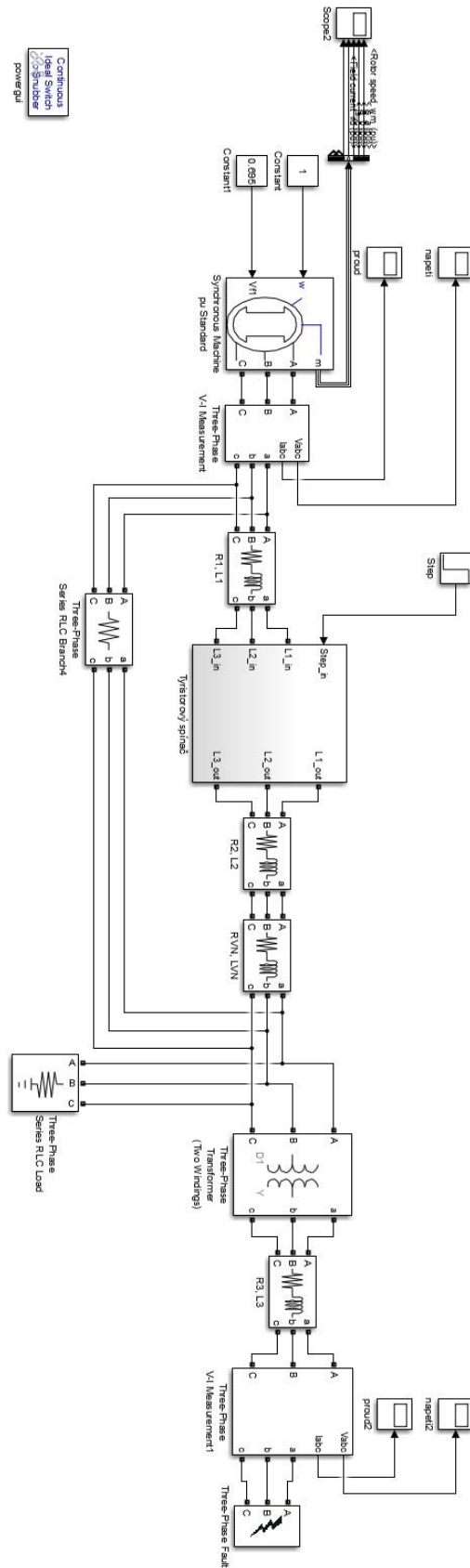
**Obrázek 9 – Průběh zkratového proudu na straně vyššího napětí**



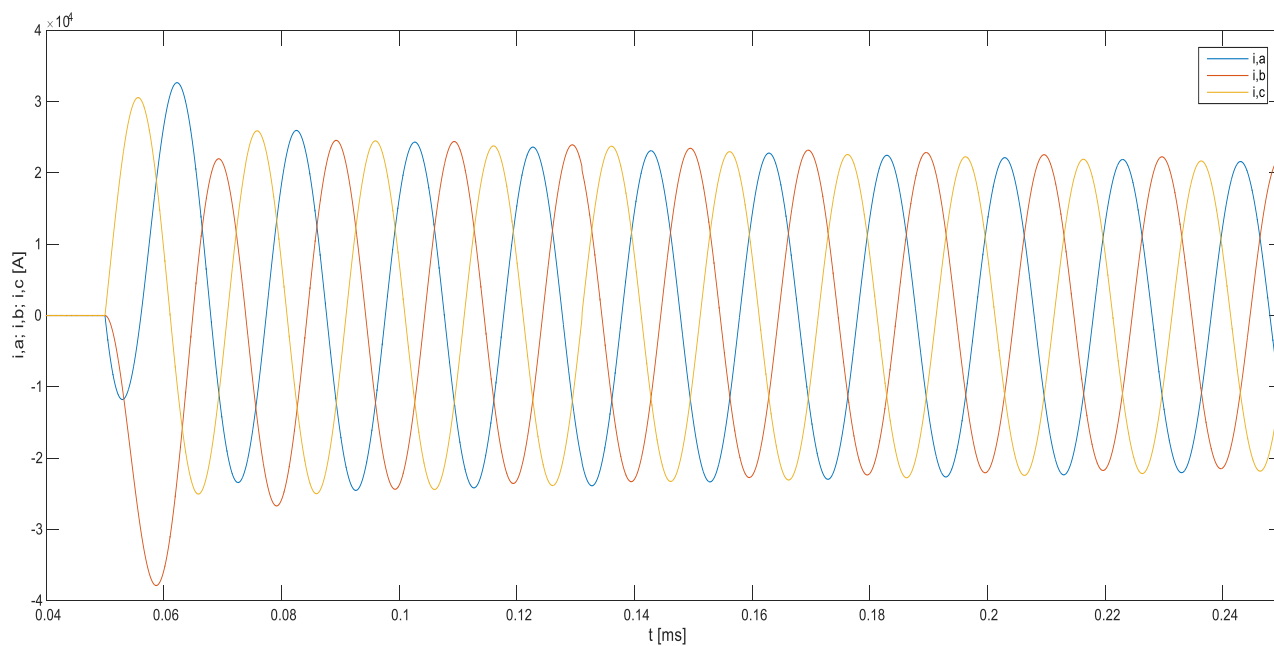
**Obrázek 10 – Průběh zkratového napětí na straně vyššího napětí**

Po odsimulování strany vyššího napětí jsme sestavili v Simulinku model celé zkratové zkušebny. V tomto modelu jsme přidali na stranu vyššího napětí tyristorový spínač a skutečnou zátěž RVN a LVN. Dále jsme do modelu přidali i odpory a indukčnosti přípojníc. Tyto hodnoty jsou uvedeny o kapitulu výše. Poté jsme za zátěže zapojili zkratový transformátor. Jeho jmenovité hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 4. Na straně nižšího napětí jsme zvolili cestu ke zkušební stoličce ZS1. V modelu jsme za transformátor přidali odpor a indukčnosti přípojníc a za ně jsme zapojili multimetr. Za multimetrem jsme obvod zkratovali pomocí bloku „Three-Phase Fault“. Schéma celé zkratovny nasimulované v Simulinku je na Obrázku 11.

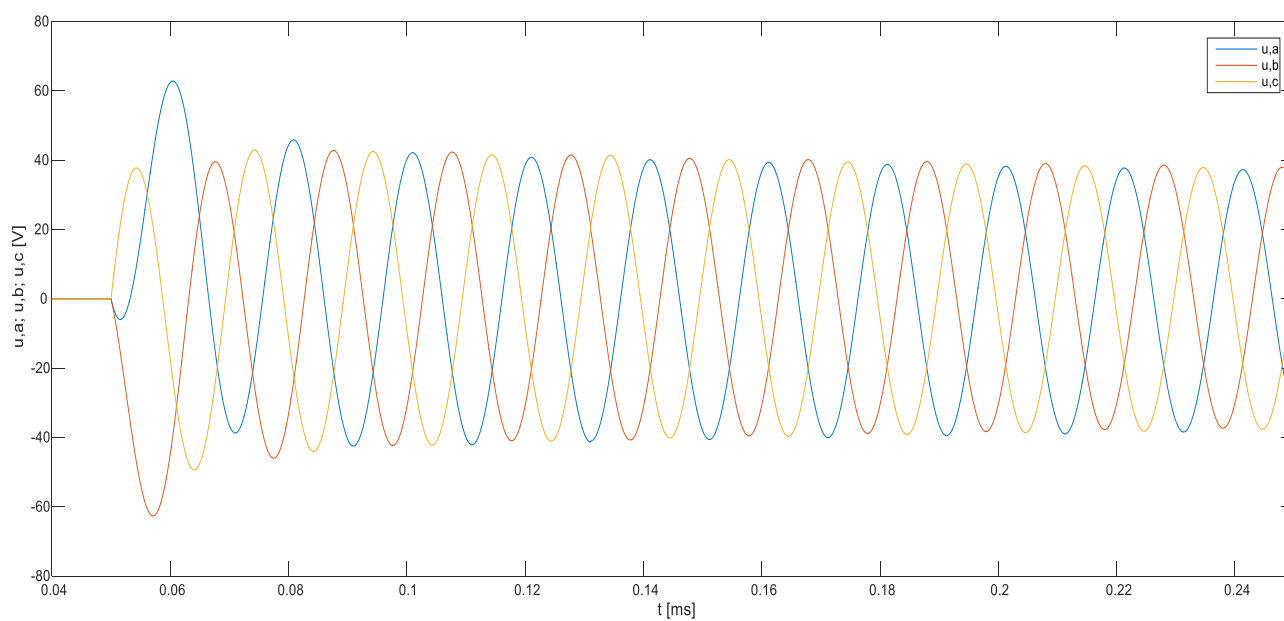
Po spuštění simulace jsme si nechali zobrazit průběhy zkratového napětí a proudu. Ty jsme pomocí stejného postupu jako u průběhů ze strany vyššího napětí přenesli do Matlabu, kde jsme si je pomocí funkce „scope“ nechali vykreslit. Tyto průběhy jsou zobrazeny na Obrázku 12 a Obrázku 13.



Obrázek 11 – Schéma zkratové zkušebny použité v Simulinku



**Obrázek 12 – Průběh zkratového proudu na straně zkoušence**



**Obrázek 13 – Průběh zkratového napětí na straně zkoušence**

**Tabulka 12 – Označení a výchozí parametry provedené zkoušky**

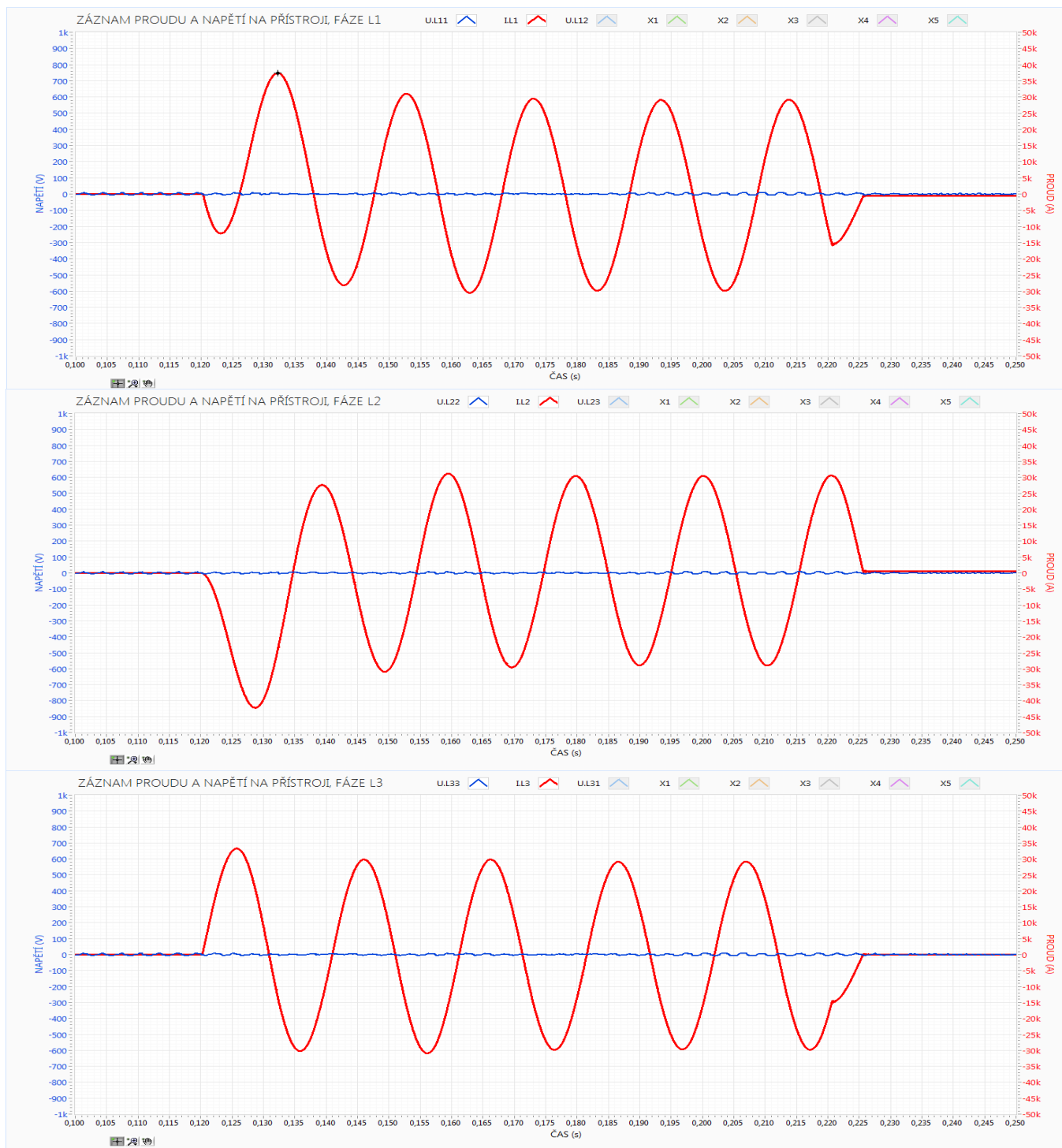
Označení	Cejch_750V_20kA-CI
Reference cejchu proudu a napětí	
Napětí	750 V
Proud	20000 A
Frekvence	50 Hz
Účinník	0,25
Typ testu	0
Trigger	RUN-OUT
Zdroj	GS1
Systém	3F-AC

**Tabulka 13 – Vyhodnocené veličiny provedené zkoušky**

RVN	$1d+3dp - 0,15+0,05 = 0,2 \Omega$
LVN	13
Buzení	69,50%
$I_p$	20,97 kA
$\cos \phi$	0,28

Průběh zkratového proudu z Obrázku 12 jsme porovnali s průběhy zkratového proudu z cejchu provedeného ve zkratové zkušebně, které jsou zobrazeny na Obrázku 14. Tyto průběhy by si měli teoreticky odpovídat, ale při simulaci mohli vzniknout nějaké nepřesnosti způsobené nepřesným určením některých náhradních parametrů. Tedy rozdíl mezi ustálenou hodnotou simulace a měření vznikl právě z tohoto důvodu.





Obrázek 14 – Průběhy zkratového proudu a napětí provedené zkoušky

## 7 ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsme se zabývali simulací zkratové zkušebny. Jednak části simulace trojfázového zkratu na synchronním generátoru a následně i simulaci celé zkratové zkušebny. V úvodu práce jsme si popsali konstrukci synchronního generátoru a jeho pracovní stavy.

V teoretické části této práce jsme si popsali zapojení zkratové zkušebny i s parametry odpovídajícími zkratové zkušebně na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně. Dále jsme si obrazně popsali, jak zkrat na synchronním generátoru probíhá, jaké jsou jeho parametry a změny v magnetickém poli. V následujícím bodu teoretické části jsme si popsali Matlabovský toolbox Simscape Power Systems a nastínili si funkce, se kterými jsme následně pracovali v praktické části práce.

V praktické části této práce jsme si v prvním bodě uvedli parametry zkratové zkušebny odpovídající naší simulované zkratové zkušebně. Některé tyto parametry byly uvedeny v poměrných jednotkách. Ty jsme museli přepočítat na reálné jednotky, aby výsledky odpovídali skutečnosti. V dalším bodě praktické části jsme si vytvořili v Simscape Power Systems model zkratu na synchronním generátoru. Tomuto modelu jsme zadali parametry vypočítané v předchozím bodu. Poskládat model tak, aby fungoval správně a dal nám správné výsledky, bylo vůbec to nejsložitější. Do modelu museli být přidávány různé komponenty a jim nastavované parametry, které jsme museli několikrát upravit. Teprve po správném nastavení parametrů v obvodu nám Simulink dal odpovídající průběhy zkratových proudů a napětí. Zkratové proudy jsou zobrazeny na Obrázku 9. Z jejich průběhu je vidět, že do doby zkratu byl proud nulový. V okamžiku zkratu došlo k velkému nárůstu a rozkmitání proudů. Tento přechodný děj se následně ustaloval. Obdobně to bylo i u napětí, které je na Obrázku 10 s tím rozdílem, že v okamžiku zkratu došlo k výraznému snížení napětí. Přechodný děj probíhal podobně jako u proudu rozkmitáním a následným ustálením.

Po simulaci zkratu na synchronním generátoru jsme vytvořili model pro celou zkratovou zkušebnu. Do tohoto modelu jsme přidali zkratový transformátor a taky jsme museli přidat odpory a indukčnosti přípojnicového systému. Po přidání těchto parametrů jsme museli trochu poupravit nastavení modelu i parametry některých bloků. Potom nám model simuloval průběhy, které odpovídají průběhům ze zkušebny. Výsledné průběhy zkratového proudu a napětí jsou zobrazeny na Obrázku 12 a Obrázku 13. Z průběhu proudu je vidět, že ustálená hodnota proudu je okolo 21 kA. Tuto hodnotu jsme ověřili měřením a přesná hodnota ustáleného proudu je 20,97 kA.

# Literatura

- [1] Power generation: Generators. *MathWorks: Simscape Power Systems* [online]. [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/simpower/features.html#power-generation>
- [2] Simscape. *MathWorks* [online]. [cit. 2016-12-30]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/simscape.html>
- [3] Simscape Power Systems: Model and simulate electrical power systems. *MathWorks* [online]. [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/simpower.html>
- [4] Simscape Power systems. *Humusoft* [online]. [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/matlab/simpower/>
- [5] MATLAB & SIMULINK. *Humusoft* [online]. [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/matlab/>
- [6] MACHOWSKI, Jan, James R. BUMBY a Janusz W. BIALEK. *POWER SYSTEM DYNAMICS: Stability and Control*. Second Edition. Chippenham: Rowe, 2008. ISBN 978-0-470-72558-0.
- [7] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VIŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. Praha: ČVUT, 1997.
- [8] *Elektrické stroje*. Brno: VUT, 2016.
- [9] *Simulace zkratových zkoušek v rámci projektu zkratovny VUT*. Brno, 2012.
- [10] <http://www.femm.info/wiki/HomePage>

# Seznam symbolů, veličin a zkratek

Značka	Veličina	Jednotka
UVEE	Ústav výkonové elektrotechniky	
$S_n$	jmenovitý zdánlivý výkon	[VA]
$U_n$	jmenovité napětí	[V]
$I_n$	jmenovitý proud	[A]
$f_n$	jmenovitá frekvence	[Hz]
$\cos \varphi$	účinník	[-]
$n_n$	jmenovité otáčky	[min <sup>-1</sup> ]
$L$	indukčnost	[H]
$R$	odpor	[Ω]
$U_{n1}$	jmenovité napětí primární strany	[V]
$U_{n2}$	jmenovité napětí sekundární strany	[V]
$u_k$	procentní napětí nakrátko	[%]
$Z_B$	bázová hodnota reaktance	[Ω]
$I_d$	střídavá složka zkratového proudu statoru	[A]
$I_{d,max}$	maximální amplituda střídavé složky proudu statoru	[A]
$I_a$	stejnoseměrná složka proudu	[A]
$i_z$	zkratový proud ve statoru	[A]
$i_a$	proud budícího vinutí fáze A	[A]
$i_b$	proud budícího vinutí fáze B	[A]
$i_c$	proud budícího vinutí fáze C	[A]
$X_d$	synchronní podélná reaktance	[Ω], [pu]
$X_d'$	přechodná podélná reaktance	[Ω], [pu]
$X_d''$	rázová podélná reaktance	[Ω], [pu]
$X_q$	synchronní příčná reaktance	[Ω], [pu]
$X_q''$	rázová příčná reaktance	[Ω], [pu]
$T_d'$	přechodná podélná časová konstanta nakrátko	[s]
$T_d''$	rázová podélná časová konstanta nakrátko	[s]
$T_q''$	rázová příčná časová konstanta nakrátko	[s]
$l$	délka	[m]
$w$	šířka	[m]
$d$	rozteč plus šířka	[m]
$t$	výška	[m]
$R_k$	odpor na kilometr	[Ω/km]
$L_k$	indukčnost na kilometr	[mH/km]